

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra materiálů a technologií pro automobily

POUŽITÍ KOVOVÝCH PĚN V KONSTRUKCI AUTOMOBILŮ

THE USE OF METALLIC FOAMS IN AUTOMOBILE DESIGN

Bakalářská práce

Autor:

Ondřej Kotrs

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Tomáš Elbel, Csc.

Ostrava 2012

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra materiálů a technologií pro automobily

Zadání bakalářské práce

Student:

Ondřej Kotrs

Studijní program:

B3923 Materiálové inženýrství

Studijní obor:

3911R034 Materiály a technologie pro automobilový průmysl

Téma:

Použití kovových pěn v konstrukci automobilů
The use of metallic foams in automobile design

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Vlastnosti kovových pěn.
3. Přehled výroby kovových pěn.
4. Lité kovové pěny.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BANHARD, J.: Manufacture, characterization and application of cellular metals and metals foams
Progress in materials science, 46, 2001, pp. 539 – 632.
[2] DAWOOD, S. A. K.; NAZIRUDEEN, M. S. S.: New method for the development of porous gray Cast
Iron Castings.] *International Journal of Metalcasting*, vol. 3, Spring 2009, issue 2, pp. 43 – 53.
[3] Metallschaum für die autoindustrie. *Metall*, vol. 57, 9/2003, s. 529-530.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Tomáš Elbel, CSc.**


Konzultant bakalářské práce: doc. Ing. Vlasta Bednářová, CSc.

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 11.05.2012




doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty

Prohlášení

Celou bakalářskou práci včetně příloh, jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 - využití díla v rámci náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (další jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3). Souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB - TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěn v příloze mé bakalářské práce budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO.

Souhlasím s tím, že bakalářská práce je licencována pod Creative Commons Attribution - Non Commercial - Share Alike 3.0 Unported licencí. Pro zobrazení kopie této licence je možno navštívit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

Bylo sjednáno, že VŠB - TUO, v případě zájmu o komerční využití z její strany, uzavře licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 ods. 4 autorského zákona.

Bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu komerčnímu využití mohou jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě dne 29. 04. 2012

Ondřej Kotrs

Ondřej Kotrs

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu prof. Ing. Tomášovi Elbelovi, Csc. a také mé konzultantce paní doc. Ing. Vlastě Bednářové, Csc. za odborné vedení a cenné rady při zpracování této bakalářské práce.

Anotace

Téma bakalářské práce jsem si vybral použití kovových pěn v konstrukci automobilů. Zaměřil jsem se na výrobu kovových pěn, jejich vlastností a využití v automobilovém průmyslu. Práci jsem rozdělil do několika oblastí. V první části se věnuji vlastnostem kovových pěn a jejich využití. Ve druhé části se zabývám jednotlivými typy výroby, kam spadají i lité kovové pěny, které jsem si zkusil odlít v praxi. Při psaní této práce jsem dospěl k závěru, že kovové pěny budou v budoucnu velice přínosným materiálem z mnoha důvodů například ke snížení hmotnosti a dobré absorpci nárazové energie v automobilech.

Klíčová slova: kovová pěna, použití, automobilový průmysl, vlastnosti.

Summary

Topic of the thesis I have chosen the use of metal foams in the construction of cars. I focused on the production of metal foams, their properties and use in the automotive industry. My thesis is divided into several areas. The first part is devoted to properties of metal foams and their use. In the second part deals with different types of production, which includes cast metal and foam, which I tried to cast in practice. In writing this work I have concluded that the metal foam in the future will be very beneficial material for many reasons such as reduced weight and good absorption of impact energy in cars.

Keywords: metal foam, use, automotive industry, properties.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| 1. Úvod..... | 1 |
| 2. Vlastnosti a použití kovových pěn..... | 3 |
| 2.1. Kovové pěny, které se nejvíce používají..... | 3 |
| 2.2. Použití kovových pěn v konstrukci automobilů..... | 4 |
| 2.3. Vlastnosti kovových pěn..... | 7 |
| 2.3.1. Volba kovové pěny jako materiálu | 10 |
| 3. Technologie výroby kovových pěn..... | 11 |
| 3.1. Pórovitý kov vyrobený z taveniny | 12 |
| 3.1.1. Přímé zpěnění plynem..... | 12 |
| 3.1.2. Roztavení práškového lisovaného kovu | 15 |
| 3.1.3. Řízené tuhnutí plynem přesycené taveniny | 16 |
| 3.1.4. Lité kovové pěny | 18 |
| 3.2. Kovová pěna vyrobená z tuhé fáze | 21 |
| 3.2.1. Zpěňování suspenze | 21 |
| 3.2.2. Reakční spékání..... | 21 |
| 3.2.3. Zachycování plynu v jádře | 22 |
| 3.2.4. Spékání kovových prášků nebo vláken..... | 22 |
| 3.2.5. Spékání kovových dutých koulí | 24 |
| 3.3. Elektrolytické pokovování | 26 |
| 3.4. Vakuové napaření | 27 |
| 4. Závěr..... | 28 |
| 5. Seznam použité literatury..... | 29 |

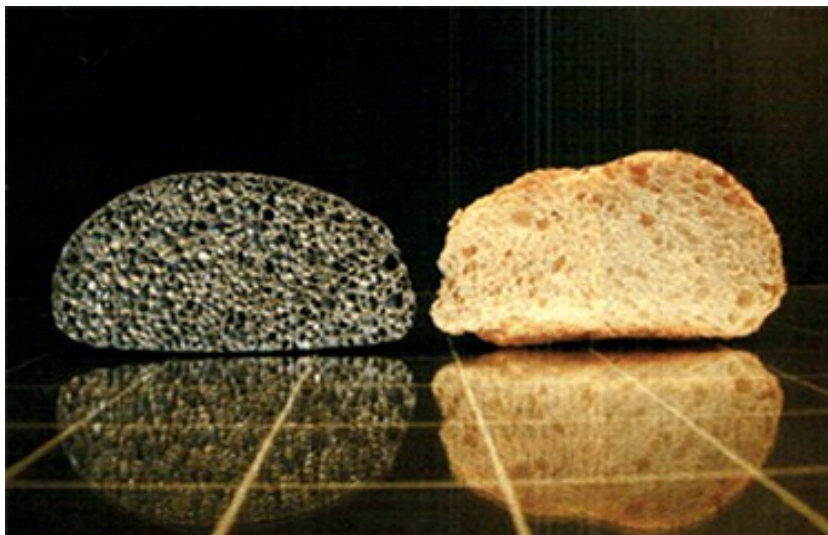
1. Úvod

V přírodě existuje velké množství porézních organických stavebních látek, které se osvědčily, protože jsou schopny přenášet velké mechanické namáhání (dřevo, kosti, korály apod.). Tyto materiály mají vysokou tuhost, díky své buňkové (celulární) struktuře a přitom jsou velice lehké. A od tohoto příkladu se nechali inspirovat vědci a vytvořili materiál s podobnou strukturou polymerní pěny, jeden z nejdůležitějších materiálů vyrobený člověkem, který je uplatněn skoro ve všech průmyslových odvětvích. Později se začal vyrábět podobný materiál, ale z jiných produktů a to především kovů ten se nazývá kovová pěna, která je vidět na (obr. 1.1). V posledních deseti letech se zvyšoval zájem o porézní materiály, a to především o pěnové kovové materiály, protože mají užitečné vlastnosti pro použití k výrobě automobilů zejména díky snižování hmotnosti a pohlcování nárazové energie, a také vyhovují požadavkům životního prostředí.

Kovové pěny jsou vysokoporézní materiál s celulární strukturou. Skládají se z kovového skeletu a pórů, které jsou úmyslně vytvořeny a jsou vyplněny plynem, přičemž póry tvoří více jak 70% objemu materiálu. Díky celulární struktuře se kovové pěny vyznačují vysokou pevností při nízké měrné hmotnosti, dobrou absorpcí nárazové energie bez ohledu na směr nárazu, vysokým koeficientem pohltivosti zvuku, dobrou tepelnou stabilitou a nehořlavostí. Na rozdíl od mnoha polymerních pěn však zůstávají kovové pěny po nárazu zdeformované, a proto můžou být použité pouze jednou. Kovové pěny si ponechají některé fyzikální vlastnosti svého základního materiálu.

Porézní materiály začaly být využívány na začátku 20. století. První komerčně vyráběné pěny se vyráběly spékáním kovových prášků a používaly se pro výrobu filtrů, baterií a samomazných ložisek. První patent na výrobu kovové pěny foukáním rtuťových výparů do kapalného hliníku získal v roce 1948 Sosnik. Uzavřené pěnové buňky kovů byly poprvé vytvořeny roku 1956, kdy je předložil John C. Elliott výzkumné laboratoři Bjorksten. Přestože první prototypy byly k dispozici v 50. letech, byla komerční výroba započata až v 90. letech společností Shinko Wire v Japonsku.

Cílem mé bakalářské práce bylo popsat a zhodnotit kovové pěny, jejich výrobu a také použití kovových pěn v konstrukci automobilů.



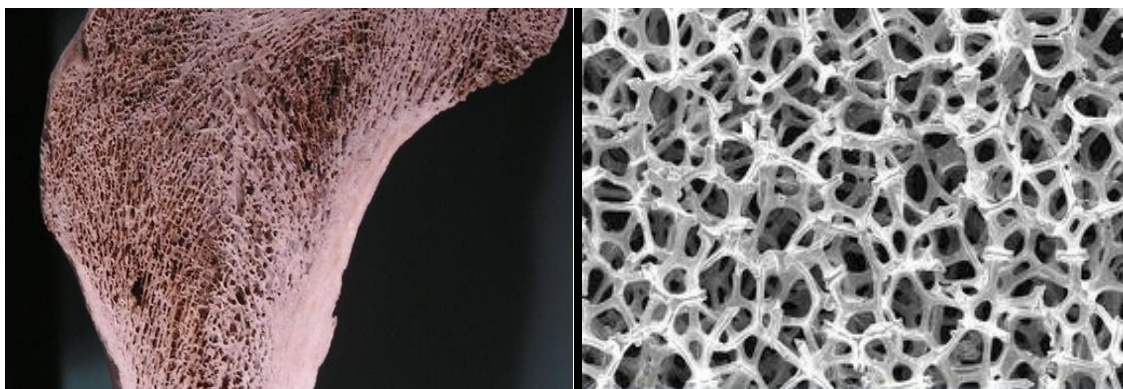
Obr. 1.1 *Struktura kovové pěny v porovnání se strukturou chleba.*[10]

2. Vlastnosti a použití kovových pěn

Existuje mnoho možností aplikace kovových porézních materiálů využívajících chytře vlastností, které jsou dány především jejich strukturou [2].

2.1. Kovové pěny, které se nejvíce používají

1. Hliníkové pěnové materiály: Mezi kovovými pěnama nachází největší uplatnění hliník a jeho slitiny, hlavně díky své poměrně nízké hustotě ($\sim 2700 \text{ kg.m}^{-3}$), nízké teplotě tání (660°C), poměrně vysoké tuhosti, houževnatosti a vynikající korozní odolnosti [4]. Hliníkové pěny jsou dále charakterizovány především dobrou pohltivostí nárazové energie a jejím tlumením, recyklovatelností a nehořlavostí. Pěnový hliník je vysoce porézní materiál, póry tvoří 60 % jeho objemu. Pro výrobu těchto pěn lze použít dvou typů slévárenských slitin – slitin určených pro odlévání a slitin určených pro tváření. Pěny vyrobené ze slitin hliníku pro tváření mají póry převážně kruhového tvaru a stěny pórů jsou tlusté. Naopak pěny vyrobené ze slévárenských slitin hliníku vykazují póry menší s nepravidelným tvarem, stěny pórů jsou velmi tenké a struktura pěny značně nerovnoměrná. Hliníkové pěny jsou vyráběny v malých sériích pro automobilky Audi [2], Lamborghini, Ferrari a jiné, které využívají vlastnosti pohlcování energie při nárazu a také nízkou hmotnost materiálu.
2. Niklové pěnové materiály: Tyto materiály jsou vyráběny ve velkém množství a využívají především jejich dobré elektrické vodivosti. V praxi se potom používají k výrobě baterií pro telefony, počítače a jinou elektroniku.
3. Titanové pěnové materiály: Tento materiál se využívá v lékařství na jedné straně díky dobré snášenlivosti titanu s lidským organismem a na druhé straně kvůli tomu, že je technicky možné vyrobit póry určitého tvaru a velikosti, které se velice podobají struktuře lidské kosti. Uplatnění nacházejí hlavně v zubním lékařství a v chirurgii u náhrad lidských kostí [2](obr. 2.1 a obr. 2.2).



Obr. 2.1 Porovnání struktury lidské kosti [7] **Obr. 2.2** a struktury kovové pěny.

2.2. Použití kovových pěn v konstrukci automobilů

Výrazný nárůst automobilového průmyslu způsobil hlavní impulsy také ve vývoji a aplikacích nových materiálů. Automobilové společnosti se staly dominantními inovátory v oblasti lehkých řešení pro moderní průmyslový design. Soustředění na nové koncepce, které šetří energii, zlepšuje pasivní bezpečnost, potlačí hluk a vibrace kol budoucích vozidel. Tyto cíle nemohou být současně dosaženy v této době použitím klasických materiálu, zlepšení v bezpečnosti a pohodlí vedou vždy ke zvýšení hmotnosti. Další revoluční krok v automobilové výrobě je možný pouze, když výroba nových strukturálních materiálů je zároveň kombinována s moderním lehkým řešením pro design a součásti, pro automobilový průmysl. Hlavním cílem je stavět automobily, při použití takového materiálu, který sníží celkovou hmotnost vozu a tím sníží i náklady na výrobu a provoz. Vše samozřejmě musí být v souladu s požadovanými bezpečnostními normami.

Kovové pěny jako materiál jsou v automobilech zatím novinkou, ale některé firmy zabývající se stavbou automobilů, tento materiál již využívají. Je jen otázkou času, kdy jej budou využívat i ostatní automobilky. Problém nevyužívání kovových pěn při výrobě více dostupných automobilů je, že materiál je nový a automobilky ho zatím zkouší a taky je dražší. Hlavní důvody, proč používat v automobilovém průmyslu kovové pěny, je že takto vyrobené materiály jsou lehké, mají dobrou pevnost a absorbují nárazovou energii. Takže v praxi se používají, hlavně na snížení celkové váhy automobilů, tím se sníží spotřeba, protože bude zapotřebí méně energie k rozpořádání vozu. Dalším důvodem je, že se kovové pěny používají v deformačních zónách (obr.2.3) (v určitých místech konstrukce, kde při nárazu

působí nejvíce energie) k ochraně pasažérů, protože při nárazu se kovové pěny deformují a tím pohlcují určité procento nárazové energie.



Obr. 2.3 Crash test automobilu Audi Q7, který používá ve své konstrukci kovové pěny [5]

Kovové pěny se používají také k částečnému plnění dutých profilů, kdy zlepšuje pevnostní vlastnosti v užších místech (obr. 2.4).



Obr. 2.4 Části motoru kde je kovová pěny využita jako výplňový materiál [18].

Využití kovových pěn zhutněním svařovaných dílů umožňuje nákladově efektivní vyztužení hlavně pro díly vyráběné v malých sériích například držáky těžkých motorů. V tomto případě je pěnová část vkládána do komponentů před svařováním bez významných změn ve společném technologickém procesu (obr. 2.5).



Obr. 2.5 *Součást vyztužená kovovou pěnou před svařováním [18].*

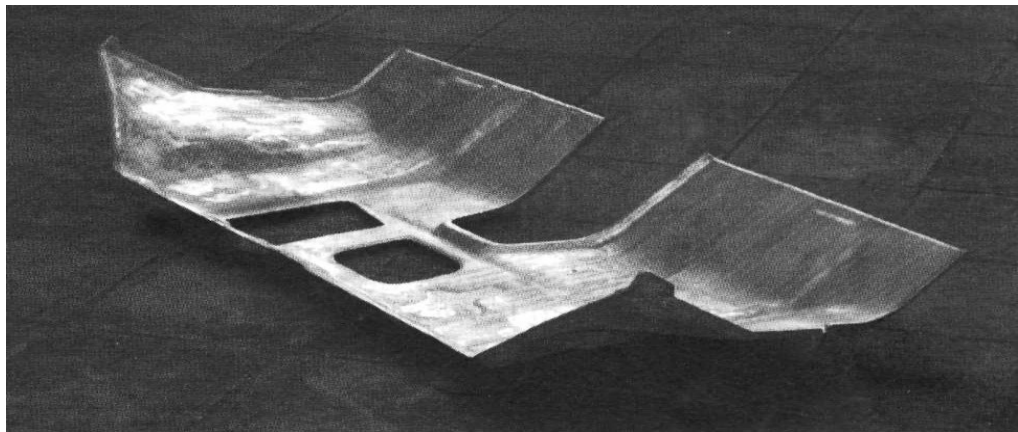
V hliníkových odlitcích interní konfigurace (výztuhy a jiné.) mohou být vyrobeny s trvalým pěnovým jádrem, což vidíme na (obr. 2.6). Relativně malé průřezy mohou být naplněny pěnovým kovem a tím šetří další hmotnost. Vzhledem k efektu doplňkového ztuhnutí pěny a možností jejího ohřátí, můžeme dosáhnout významné snížení tloušťky stěny a mechanické vlastnosti zůstanou beze změny, nebo se zlepší.



Obr. 2.6 *Hliníkové odlitky s jádrem hliníkové pěny [18].*

Komplexní části rámu z vyztužených pěn

Komplexní části rámu z vyztužených pěn jsou slibné pro lehké tuhé konstrukce rámu pro budoucí vozidla, protože mohou být vyrobeny za relativně nízkých nákladů. Komplexní součást vyrobená z pěnového hliníku, vidíme na (obr. 2.7), takto vyráběné části jsou vždy pokryté hustou hliníkovou vrstvou, která zvyšuje mechanické vlastnosti. Avšak přírodní horní vrstva pěn má odlišnou tloušťku a někdy obsahuje malé otvory nebo trhliny. Tyto nevyhnutelné vady mohou způsobovat předčasné zlomení pěn. Tento problém může být vyřešen velmi efektivně tím, že se zvýší pevnost v tahu zatíženého povrchu, tím že do kovové pěny přidáme kovové nebo keramické výztuže.



Obr. 2.7 Komplexní panel vyroben z vyztužených kovových pěn [18]

2.3. Vlastnosti kovových pěn

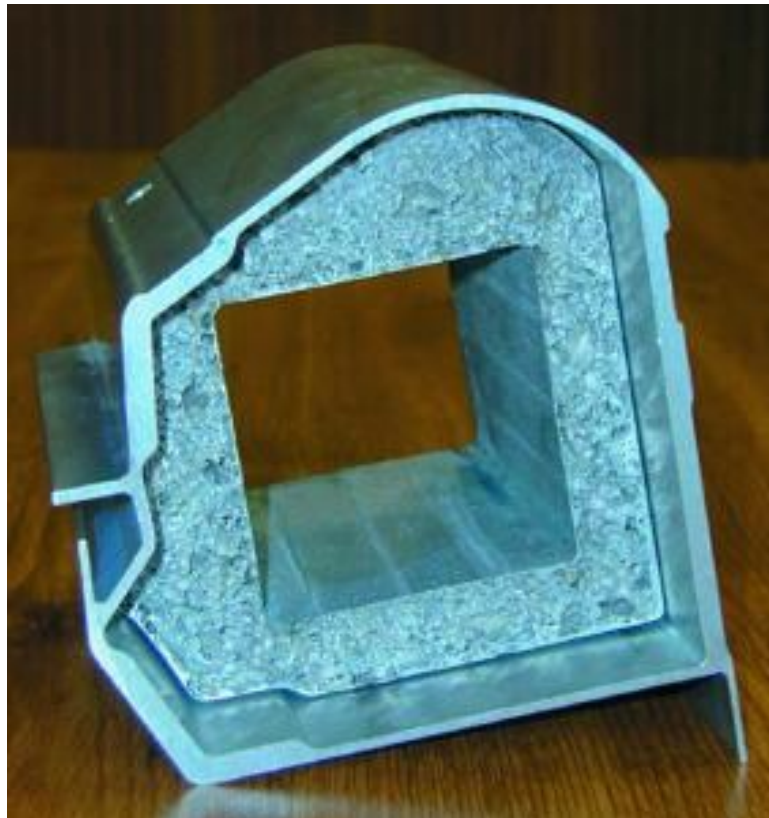
a) Absorbce energie

Díky své vysoce pórovité struktuře jsou kovové pěny schopny pohlcovat velké množství mechanické energie při deformaci [3]. Tyto vlastnosti se používají pro deformační zóny vozidel a výtahů. Absorbce (tlumení) energie, nepopíratelně nejvýznamnější vlastnost. Využívá se schopnost deformování při konstantním a relativně nízkém napětí – jestliže dojde k nárazu, materiál absorbuje při poměrně malém objemu velké množství nárazové energie. Tato vlastnost je nejvíce významná v oblasti dopravy, na ochranu vozidla a cestujících při nárazu [2]. Této vlastnosti se snaží využívat automobilka Audi, předvedla to při představování modelu Q7, a také automobilka Lamborghini. Tlumení energie se v automobilech testuje při crash (havarijních) testech automobilů, které se připravují k

zavedení do výroby. Kovová pěna jako materiál je u nás v České republice nová a začíná se teprve testovat.

b) Hmotnost kovové pěny

Porézní kovy jsou samy o sobě lehké a ve tvaru tenkých žebér mohou získat stejné hodnoty mechanické pevnosti jako těžší konstrukce [2]. Obrovský aplikační potenciál má pěnový hliník v oblasti lehkých konstrukcí. Když se součástky vyrobené z hliníku vhodným způsobem povrchově vyztuží v místech, ve kterých se očekává největší tahové namáhání, výrazně lze dosáhnout snížení hmotnosti jednotlivých dílů při zachování požadovaných mechanických vlastností. Použití v automobilovém průmyslu je také díky hmotnosti tohoto materiálu a tím snížení celkové váhy automobilu, jako tomu je například u automobilky Ferrari, která využívá tohoto materiálu v prazích automobilu (obr. 2.8). Dále se požívají také na stavbu lodí, aby snížily celkovou váhu lodi a tím se zvýšil její výkon. Měrná hmotnost kovové pěny je čtvrtinová oproti vodě a díky tomu plave na hladině a hodí se pro stavbu lodí tam, kde lodě musí mít nižší ponor [8].



Obr.2.8 Výtuka prahů automobilů Ferrari z pěnového hliníku [4]

c) Absorbce zvuku a vibrací

Vyrobené díly z pěnového hliníku mají dobrou vlastnost tlumit vibrace i pohlcovat zvuk. Průmyslová aplikace kovové pěny lze využít zejména v případech, kdy konstrukční součástka využívá současně všechny jeho přednosti, to je například nízkou hustotu, schopnost absorbce nárazové energie, tlumení hluku a vibrací, poměrně vysokou specifickou tuhost materiálu. Tyto všechny vlastnosti lze využít například u držáku motoru (obr. 2.9). Tlumení zvuku se používá také v jiném odvětví, jako jsou například zvukové bariéry podél větších silnic nebo dálnic.



Obr. 2.9 Držák motoru pro BMV[4]

d) Tepelná izolace

Kovové porézní materiály si ponechávají své mechanické vlastnosti i za vysokých teplot a při vystavení plamenům se z nich neuvolňují organické páry. Díky své nehořlavosti, malé relativní hmotnosti a dobrým zvukoizolačním vlastnostem se kovové pěny používají pro obvodové konstrukce, zavěšené stropy podhledů, přepážky v kancelářích, kabiny výtahů, dveře, detaily nábytku [3]. Pěny s otevřenými póry se používají jako filtry s vysokou tepelnou a chemickou odolností. Tepelná vodivost hliníkové pěny s uzavřenými póry je malá a toho lze využít při konstrukci různých nehořlavých tepelných štítů a tepelných izolátorů. Pěnový kov má dobré uplatnění všude tam, kde se od něj požaduje současně vyšší tuhost nebo bezpodmínečná nehořlavost.

e) Ochrana proti výbuchům a nárazům

Dále se tento materiál používá na nevojenské i vojenské účely. K absorpci energie, zvuku a vibrací se využívá jejich velký povrch a tepelně izolační vlastnosti [2].

f) Výměna tepla nebo elektřiny

Kovové porézní materiály se spojenými buňkami mají velký specifický povrch, který jim propůjčuje lepší schopnost výměny tepla nebo elektřiny [3]. Hliníkové pěny s otevřenými póry, díky svému velkému povrchu a vysoké tepelné vodivosti v kombinaci s dobrou korozní odolností, používají jako výměníky tepla. Elektrická vodivost se využívá především v elektronice pro baterie, které jsou vyrobeny především z niklové kovové pěny (obr. 2.10).



Obr. 2.10 Baterie pro mobilní telefon vyrobená z niklové kovové pěny [6]

2.3.1. Volba kovové pěny jako materiálu

Kontrast mezi velkými možnostmi kovových porézních materiálů a jejich ještě stále omezeným průmyslovým využitím vzbuzuje otázku, „proč se tak cenný a kvalitní materiál s tolika užitečnými vlastnostmi využívá tak málo“? Lze uvést 3 příčiny:

- Čistě ekonomické důvody.
- Důvody spočívající v problémech s jejich využitím.
- Obava konstrukčního oddělení, že nebudou schopni předem určit vlastnosti tohoto nového materiálu, které jsou nezbytně nutné pro stanovení rozměrů součástí s porézním materiálem [2].

3. Technologie výroby kovových pěn

V dnešní době existuje řada způsobů výroby pórovitých kovových materiálů. Některé výrobní technologie jsou velmi blízké postupům pro zpěnění polymerů, naopak další jsou vytvořeny s ohledem na charakteristické vlastnosti kovových materiálů, například jejich schopnost ke spékání nebo skutečnost, že mohou být elektrolyticky nanášeny.

Způsoby výroby jsou více či méně složité. Zahrnují jak práškovou metalurgii, odlévání, plazmové nanášení atd. [2]. Pórovité kovové materiály se mohou vyrábět z tekutého kovu, z kovového prášku, z kovových par a nebo z ionizovaného kovu. Dle stavu, ve kterém se kov zpracovává se výroba kovových pěn dělí do 4 skupin (obr. 3.1).

| Pórovité materiály | | | |
|--------------------|--|---|----------------------------|
| Kovové páry | Tekutý kov | Kovový prášek | Ionizovaný kov |
| Vakuové napařování | Přímé zpěnění plynem Zpěnění pomocí zpěňovadla Tuhnutí plynem přesycené taveniny Tavení kovového prášku Slévárenské metody Sprejování | Spékání dutých kuliček Zachycování plynu Vzpěnění suspenze Spékání prášků nebo vláken Reakční spékání | Elektrochemické pokovování |

Obr. 3.1 Výrobní postupy pórovitých kovových materiálů.[1]

3.1. Pórovitý kov vyrobený z taveniny

První skupina zahrnuje výrobní proces porézního materiálu z tekutého kovu. Z roztaveného kovu se vyrábí kovová pěna buď přímým zpěněním taveniny, nebo pomocí použití polymerní pěny a nebo zalitím výplňového materiálu, který po odstranění zanechá póry ve struktuře materiálu. Další možnost výroby spočívá v natavení kovového prášku obsahujícího zpěňovadlo, které při rozkladu uvolňuje plyn [1].

3.1.1. Přímé zpěnění plynem

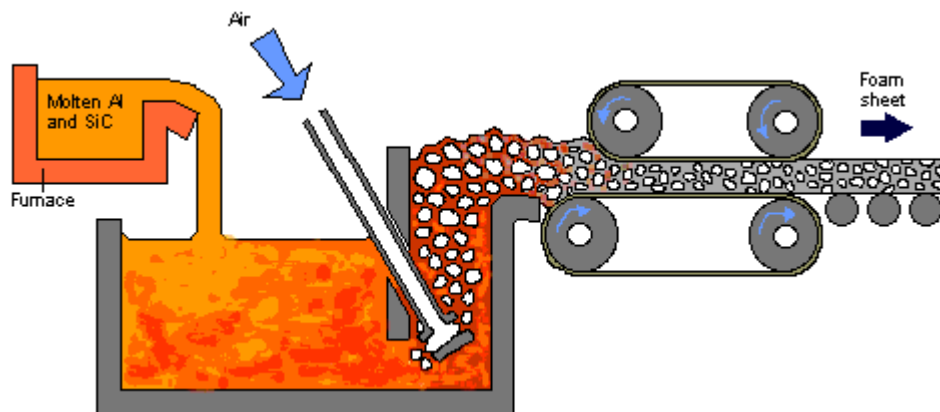
Roztavený kov bývá zpěněn za určitých podmínek vytvořením plynových bublin v tavenině. Vytvořené bubliny se snaží vyplouvat na povrch taveniny, ale lze tomu zabránit zvýšením viskozity taveniny, a to přidáním jemných keramických částic nebo stabilizačních přísad. Zatím známe dva postupy, jak přímo zpěnit taveninu kovu:

- injektáží plynu do roztaveného kovu z externího zdroje.
- přidáním zpěňovadla uvolňujícího plyn do kovu [1].

a) Vhánění plynu do taveniny kovu

Toto je nejjednodušší metoda zpěnění tekutého kovu, spočívá ve foukání plynových bublin do taveniny. Nejdůležitější podmínkou je vytvoření drobných bublin rovnoměrně rozložených v objemu taveniny a udržování těchto bublin v tavenině do jejího ztuhnutí.

Známe dva způsoby, jak se dá vyrábět pěnový hliník (v literatuře označovaného SAF – Stabilized Aluminium Foam), a to vodorovné kontilití a nízkotlaké lití. Při horizontálním kontilití se do hliníkové taveniny přimíchají jemné keramické částice (SiC , Al_2O_3 nebo MgO) pro zvýšení viskozity taveniny (obr. 2.2). Objemový podíl částic stabilizujících pěnu je 10 až 20%, průměrný rozměr částic se pohybuje od 5 do 20 μm [3]. Stabilizujícího účinku lze dosáhnout volbou optimálního úhlu smáčení. Při malé, rovněž stejně jako při příliš velké smáčivosti keramických částic taveninou, nedochází ke stabilizačnímu účinku.



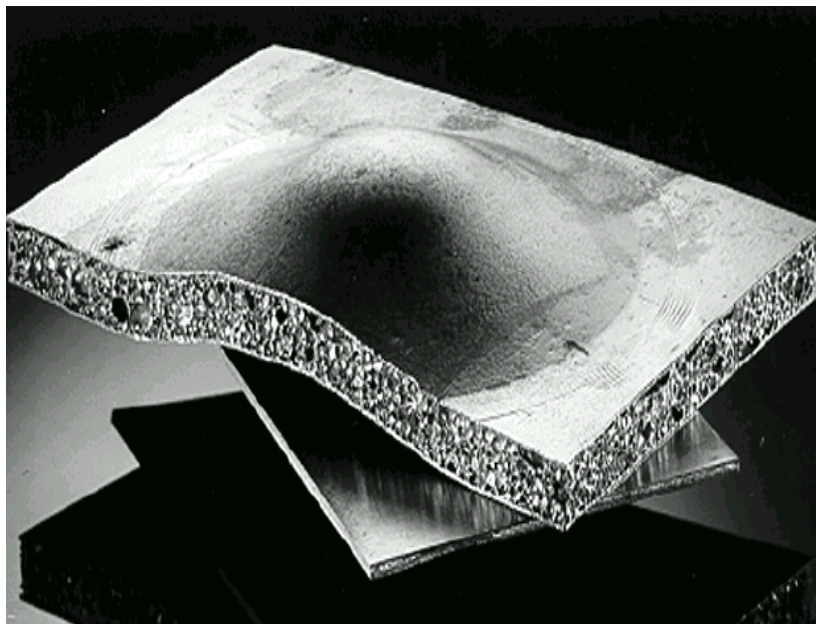
Obr. 3.2 *Kontinuální výroba pásu z kovové pěny přímým přidáním plynu do taveniny se zvýšenou viskozitou [14].*

Překlad: (Molten Al and SiC » Roztavený hliník a karbid křemíku, Foam sheet » Směr postupu pásu vyrobený z pěny, Air » Vzduch).

V dalším kroku výroby se vhání plyny jako je například, vzduch, dusík nebo argon do roztaveného kovu pomocí speciálního dmyhadla. Tyto plyny, které se do taveniny přidávají vytváří velice jemné a rovnoměrně rozptýlené bubliny. Vytvořený pěnový pás vytahuje pásový dopravník z tavicí pece, při tom dochází k ochlazování a tunutí výrobku [12].

Technologie nízkotlakého lití trojrozměrných pěnových odlitků (obr. 3.3) je upravenou metodou nízkotlakého lití, používanou například při lití hliníkových kol. Tavenina, obsahující keramické částice se vstříkuje do dutiny formy, do které je odstředivým dmyhadlem vháněn plyn a vznikají bubliny zpěňující taveninu. Danou technologií lze také vyplňovat pěnou ocelové nebo hliníkové součástky [3].

Tento proces je používán pro děláni kovových pěn ve velkém množství, za nízkých nákladů, ale pěny vyrobeny tímto postupem se vyznačují nízkou kvalitou. Výhodou tohoto způsobu výroby je možnost kontinuální výroby velkého množství pěny (900 kg.h⁻¹) a získání tak nízké hustoty pěnového materiálu. Nevýhodou je nutnost odřezávání porézního polotovaru, to znamená otevření pórů. Další nevýhodou je těžko kontrolovatelný plynový rozptyl a taky velikost pórů, materiál má často velké póry, které jsou špatné pro pevnost.



Obr. 3.3 Deska vyrobená z kovové pěny. [11]

b) Výroba při použití kovu s nízkou vypařovací teplotou

Tavení se provádí v autoklávu, kde se kovy ohřejí na teplotu vyšší, než je teplota vypařování rtuti. Tlak uvnitř nádoby brání vypařování rtuti a ohřev se provádí na teplotu tání hliníku, vzniká tak hliníková tavenina přesycená parami rtuti. Tavenina se vyjme z autoklávu, rtuť se začne vypařovat, zvětšovat objem taveniny a vytvářet tím pěnu, která se ochlazuje a tuhne [3].

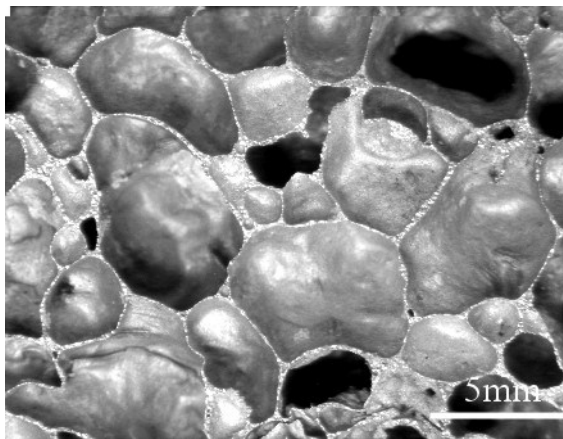
Tento způsob výroby se příliš nepoužíval. Byl nebezpečný hlavně při rychlé expanzi kovu za vysokých teplot a tlaků a také kvůli nebezpečnosti kovů určených k vypařování (rtuť, hořčík, zinek a kadmium). Vznikající pěna je nestabilní a je náchylná k zborcení během tuhnutí. Při každém dalším odlévání nelze dosáhnout stejné struktury pěny, takže výsledky jsou stěží reprodukovatelné [3].

c) Výroba při použití zpěňovadla

Způsob výroby produkující kvalitnější pěnu, tím je myšleno pěnu s jemnějšími póry, které jsou pravidelnější. Tyto vlastnosti jsou docíleny použitím zpěňovadla a to je tvořené práškem nebo sloučeninou, která je stabilní při pokojové teplotě, ale když zvýšíme teplotu dochází k tepelnému rozkladu a uvolňuje se plyn, který tvoří v tavenině póry.

Tato metoda používá obchodní název ALPORAS, vyrábí ji firma Shinko Wire ležící v Japonsku, touthle metodou výroby se zabývá už od roku 1989. Struktura ALPORAS pěny je znázorněna na obrázku (obr. 3.4) postup výroby je, že se do hliníkové taveniny přidává kovový vápník, tavenina je míchána a její viskozita se zvyšuje v důsledku vzniku CaO , CaAl_2O_4 . Po dosažení požadované viskozity taveniny, se do ní přidává hydrid titanu (TiH_2), který se při teplotě 680°C začíná rozkládat a tím vytvářet vodíkové bubliny. Tavenina začne expandovat a její objem narůstá, dokud se nezaplní celá dutina formy. Po ochlazení hliníkové pěny pod teplotu tání hliníku se získá tuhý blok pěnového hliníku [3].

Výhodou této výrobní technologie je, že vyrobený materiál je stejnorodý s uzavřenými póry. Naopak nevýhodou jsou vyšší výrobní náklady.



Obr. 3.4 *Struktura pěny ALPORAS* [13]

3.1.2. Rztavení práškového lisovaného kovu

Prášek vyrobený z kovu se míchá se zpěňovadlem a potom se lisuje při nízké teplotě do určitých polotovarů. Dalším výrobním dějem je roztavení původního materiálu, při tom dochází k roztavení zpěňovadla, které je pravidelně rozmístěno v matrici. V materiálu dochází ke zvyšování objemu plynu a tím se v materiálu tvoří porézní struktura. Největší možná expanze i hustota kovové pěny se dá ovlivňovat množstvím zpěňovadla a nastavením technologických parametrů, např. teploty a rychlosti ohřevu [1]. Velikost prekurzoru a teplota jsou hlavní faktory, které nám ovlivňují dobu, potřebnou k celkové expanzi. Tato doba se pohybuje v rozmezí několika sekund až po několik minut.

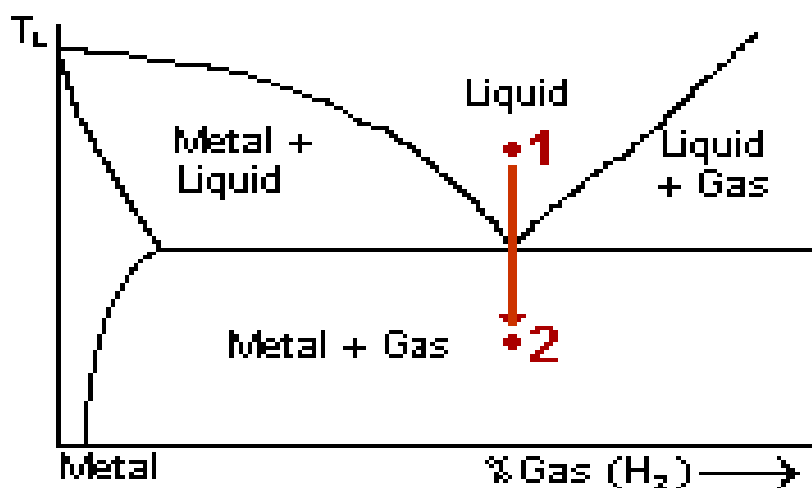
Touto metodou se dají vyrábět kovové pěny nejen z hliníku, ale také z cínu, zlata, olova a mosazi. Vyrábějí se takto například sendvičové desky a součástky, které mají souvislou kovovou vrstvu (obr. 3.5).



Obr. 3.5 Sendvičové desky a výrobky se souvislou kovovou vrstvou [15].

3.1.3. Řízené tuhnutí plynem přesycené taveniny

Metoda je založená na eutektické reakci plynu, která probíhá při krystalizaci kovů nebo slitin přesycených plynem (nejčastěji vodíkem) [3]. Vodík jako plyn je pro tento způsob vhodný, dá se použít s většinou kovů. Dále můžeme použít také dusík, ten ale vytváří chemické reakce se spousty kovů a jeho používání je proto omezoováno. Použít můžeme také kyslík, který se používá pouze v kombinaci se stříbrem.

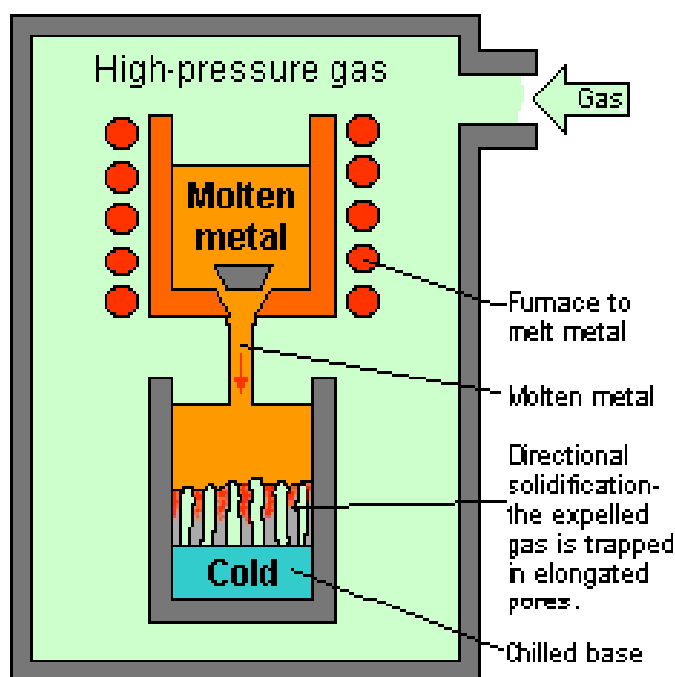


Obr. 3.6 Fázový diagram hliník - vodík [14].

Překlad: (Metal » Kov, Liquid » Tavenina, Gas » Plyn).

Obrázek (obr. 3.6) nám znázorňuje diagram Al – H₂, u niž dochází k rozkladu na hliník a vodík tak, že přesycená tavenina vodíkem je ochlazována a při eutektické teplotě dojde k samotnému rozkladu.

GASAR proces (obr. 3.7), je proces kde se hliník taví v atmosféře vodíku používá se k tomu autokláv, který má systém na regulaci tlaku, abychom dosáhli eutektické koncentrace. Do nádoby ze spodu chlazené přelijeme taveninu (již nasycenou plynem), ta usměrněně tuhne rychlostí 0,05 až 5 mm.s⁻¹. Protože s klesající teplotou se neočekávaně snižuje rozpustnost vodíku v hliníku, dochází k vylučování přesyceného vodíku z tuhého roztoku, ten v materiálu tvoří protáhlé póry, orientace póru závisí na směru odvodu tepla.



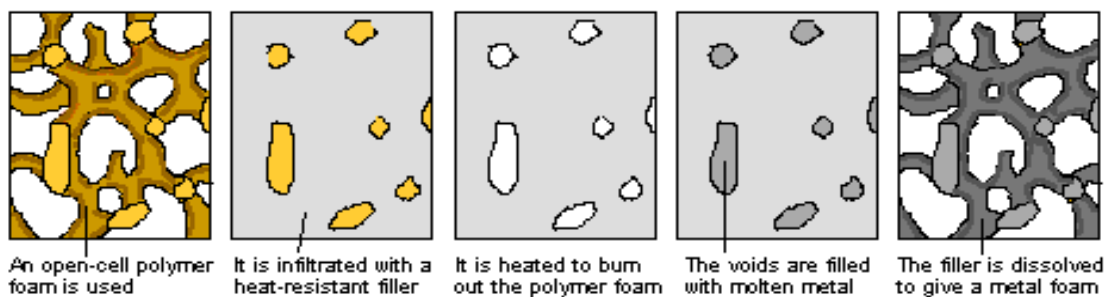
Obr. 3.7 GASAR proces [14].

Překlad: (High – pressure gas » *Vysoký tlak plynu*, Molten metal » *Roztavený kov*, Gas » *Plyn*, Furnace to melt metal » *Pec na roztavení kovu*, Directional solidification - the expelled in elongated pores » *Řízené tuhnutí – protáhlé póry ve směru odvodu tepla*, Chilled base » *Chlazená základna*).

3.1.4. Lité kovové pěny

a) Lití na odpařitelný model

Lití na odpařitelný model z polymerní pěny se používá pro výrobu kovové pěny s otevřenými póry, která kopíruje tvar polymerní pěny [3]. Celý postup výroby probíhá, že otevřené dutiny polymerní pěny se zaplní materiálem, který má dobrou žáruvzdornost, například sádrou. Potom zahřejeme formu asi na 700°C pro vyžhání sádry a spálení polymerní pěny [14]. Kov se roztaví, vyplní vzniklé dutiny a zkopíruje tak strukturu polymerní pěny. Zabíhavost zvýšíme tak, že použijeme kombinaci předehtívání formy s vakuovým a tlakovým litím. Nakonec odstraníme sádru, a vznikne nám kovová pěna, ta je přesnou kopií polymerní pěny.



Obr.3.8 Výroba kovové pěny s otevřenými póry při použití modelu z polymerní pěny [14].

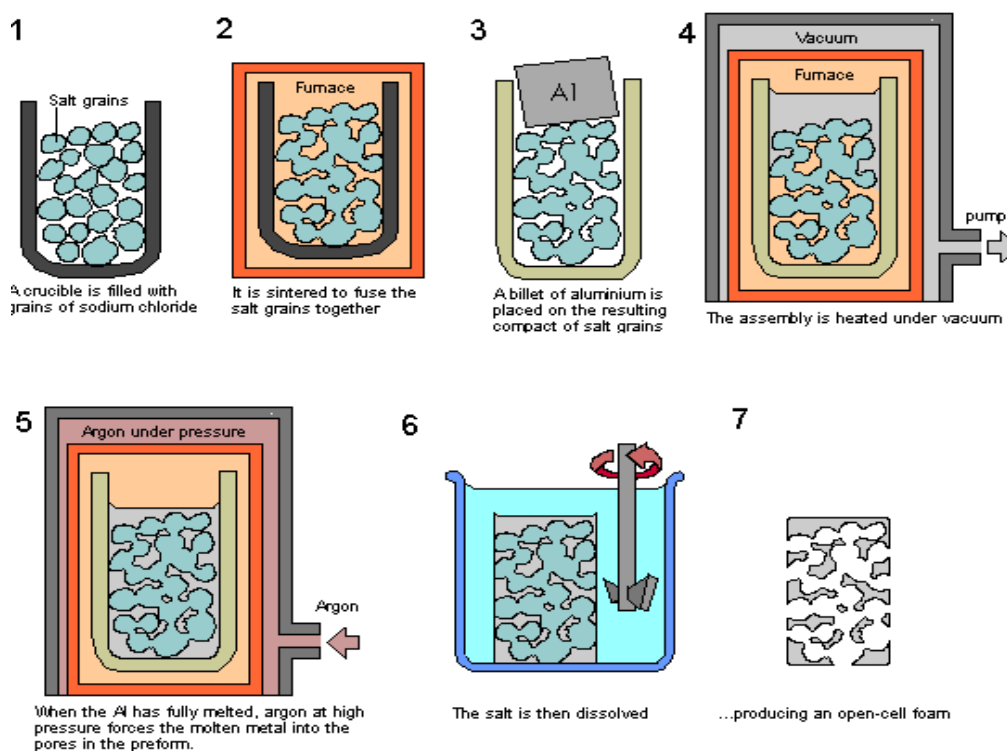
Překlad: 1. Použití polymerní pěny jako výplňového materiálu. **2.** Pro odstranění polymerní pěny formu žháme. **3.** Zaplnění formy tekutým kovem pod tlakem. **4.** Tuhnutí kovu rozpuštění sádry. **5.** Vyrobená kovová pěna

b) Zalití výplňového materiálu roztaveným kovem

Danou metodou se vyrábí kovová pěna za použití anorganických (někdy i organických) granulí, kdy je dáváme buď do formy a potom zalijeme roztaveným kovem nebo granule dáváme přímo do taveniny kovu. Granule z kovu odstraníme, jedině jestli máme velký obsah granulí a všechny se mezi sebou propojily. Jako výplňový materiál používáme granule vypálené z hlíny, sůl, kuličky písku atd. Můžou nám vzniknout dva typy pěny a to v odlitku zůstanou granule nebo se granule odstraní vyžháním.

Jeden ze způsobu jak vyrobit kovovou pěnu spočívá v použití preformy rozpustné ve vodě. Musíme použít materiál, který se rozpouští ve vodě a vydrží vysoké teploty roztaveného

kovu. Tímto materiálem zaplníme danou formu. Jako výplňový materiál používáme nejčastěji kamennou sůl, a to z ekonomického hlediska. Sůl se ve formě střešá do té doby, než dosáhne požadované hustoty (obr. 3.9 – 1). Sůl se dále speče (obr. 3.9 – 2) a zchladí. V místech kde se zrna soli dotýkají, se nataví a slepí a sůl vytvoří propojenou strukturu kopírující tvar dutiny formy s otevřenými kanálky v místech mezi zrny (obr. 3.9 – 3). V jednodušším procesu se roztavený hliník lije do formy a zaplní kanálky. Poté následuje odstranění soli, kdy odlitek vyndáme z formy, ochladí se, a aby se odstranila sůl tak se celý ponoří do vody (obr. 3.9 – 6). Takto vyrábíme pěnu s otevřenými póry. Když, použijeme jemný solný prášek, tak se využívá zvýšeného tlaku pro infiltraci soli hliníkem. Preforma tvořená ze soli se udržuje ve vakuu, dokud se hliník natavuje na jejím povrchu (obr. 3.9 - 4), následuje infiltrace a v místě vakua působí vysoký tlak inertního plynu (obr. 3.9 - 5). Dále se rozpouštěním ve vodě odstraňuje sůl (obr. 3.9 - 6) a vzniká pěna s otevřenými póry (obr. 3.9 - 7) [14].



Obr. 3.9 Výroba pěny s otevřenými póry s použitím preformy rozpustné ve vodě [14].

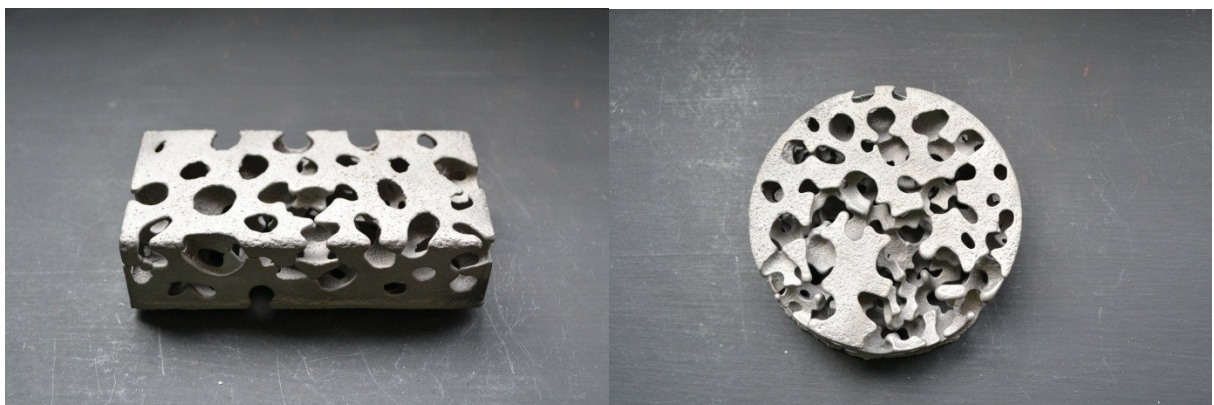
Překlad: 1. Kelímek naplníme zrny NaCl. 2. Spékání zrn soli v peci. 3. Hliníková kostka se položí na vzniklé solné jádro. 4. Tavení ve vakuu. 5. Po roztavení hliníku se nastaví přetlak argonu, tavenina vniká do pórů mezi zrny soli. 6. Rozpouštění soli. 7. Pěny s otevřenými póry.

Na vývoji tohoto způsobu odlévání jsem se mohl podílet v rámci diplomových prací, které probíhají na katedře slévárenství. Hlavním cílem bylo zjistit, jak se bude výplňový materiál chovat, při zalití kovem. Odlévali jsme do pískové formy a jako výplňový materiál jsme použili prekurzory (obr. 3.10), které jsme vytvořili rozdrčením jádra pojeného organickou pryskyřicí. V tomhle případě bylo jádro vyrobeno skořepinovým formováním (metodou Croning).



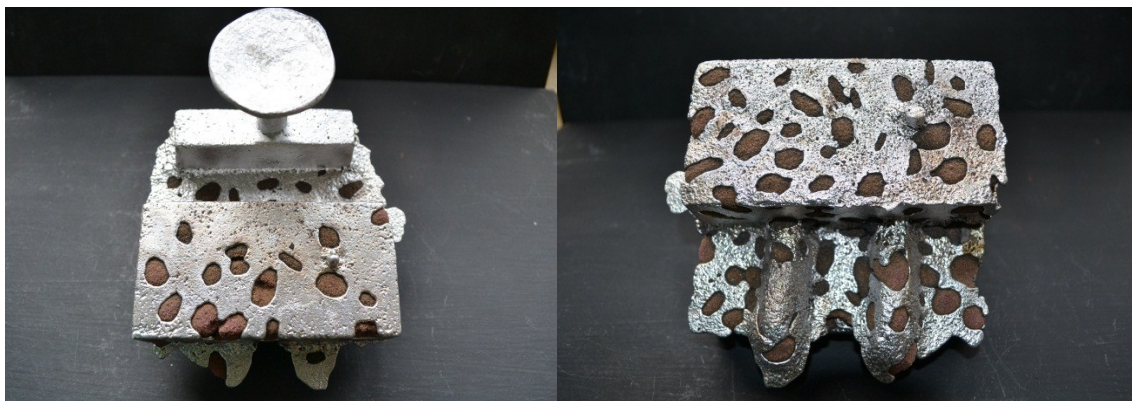
Obr. 3.10 Písková formy vyplněna prekurzory z croningového jádra.

Poté jsme formu uzavřeli a začali lít roztavený kov do dutiny formy. V prvním případě jsme použili roztavenou litinu na 1300 °C a nalili do formy. Teplota byla dost vysoká na to, aby z prekurzoru vypálila pryskyřici a zbylá obalová směs se z dutin odstranila. Daný odlitek je znázorněn na (obr. 3.11).



Obr. 3.11 Litinová kovová pěny vyrobená zalitím výplňového materiálu taveninou.

Druhý pokus probíhal stejným postupem jako předchozí. U tohoto odlévání jsme jako materiál použili hliník, který jsme zahřáli na 660 °C a tím z něj udělali taveninu. Tu potom nalili do formy. Rozdíl byl ten, že u druhého odlévání se nám nevypálila pryskyřice, protože teplota roztaveného hliníku byla nízká a cironingová jádra zůstala v celku uvnitř kovu. (obr. 3.12).



Obr. 3.12 Odlitek hliníku při použití prekurzoru z croingového jádra.

3.2. Kovová pěna vyrobená z tuhé fáze

3.2.1. Zpěňování suspenze

Některé kovové pěny se mohou vyrábět způsobem, kdy se využívá suspenze z kovového prášku, který je smíchán se zpevňující přísadou. Tato suspenze se poté zamíchá a takto namíchaná suspenze se lije do dutiny formy, kde se zvýší teplota a tím se suší. Uvolňuje se plyn, tím dochází ke zpěňování suspenze, a také se zvyšuje viskozita suspenze. Zpěněná suspenze pokud je dobře stabilizována se může úplně vysušit a tím vzniká kovová pěna. Nevýhoda takto vyrobeného materiálu je, že má menší pevnost a v materiálu dochází ke vzniku trhlin.

3.2.2. Reakční spékání

Pórovité materiály se také vyrábějí reakčním spékáním. Tuto metodu výroby provádíme smícháním dvou kovových prášků, které při exotermické reakci vytvoří

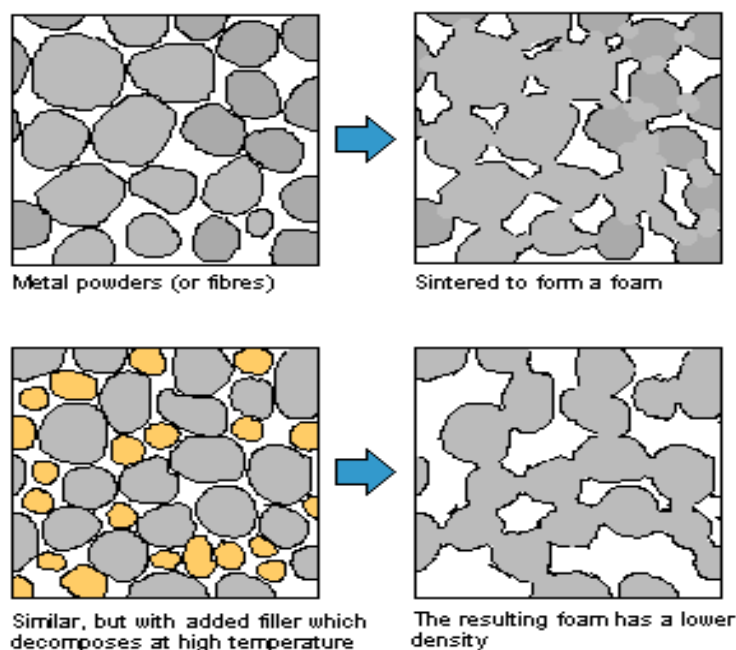
intermetalickou sloučeninu a v následném slisování a zapálení směsi. Po reakci pórovitost vzorku vzrůstá obecně o 10 až 25 % a částice se pevně spojují do pěny s otevřenými póry. Daná technologie výroby dosahuje velikosti pórů do 1mm, celý proces je proveden rychle a energeticky nenáročně. Použití materiálů je, ale značně omezeno [16].

3.2.3. Zachycování plynu v jádře

Postup výroby daným způsobem děláme tak, že nejprve nasypeme prášek do nádoby, prášek má stejné chemické složení jako nádoba, která je vyrobena ze slitiny TiAl_6V_4 . Z nádoby se odstraní plyn a tím se v ní vytvoří vakuum, a poté se natlakuje argonem. Dalším krokem je hermetické uzavření nádoby a izostatické lisování za tepla tlakem $> 100 \text{ MPa}$ po dobu asi 6 h při teplotě $1100 \text{ }^\circ\text{C}$. Prášek se zhutní natolik, že pórovitost dosahuje pouhých 2 % a póry jsou zaplněny stlačeným argonem. Dále provádíme tváření za tepla a žíhání. Během žíhání plynové póry pomalu expandují a snižuje se vnitřní napětí, dokud se nedosáhne rovnováhy mezi tlakem plynu a pevností materiálu při dané teplotě. Vznikají tak sendvičové konstrukce s pórovitými jádry (pórovitost se pohybuje mezi 20 a 40 %, poloměr pórů od 10 do $100 \text{ }\mu\text{m}$) [3] Tento způsob výroby se také nazývá jako Low Density Core Process (LDC).

3.2.4. Spékání kovových prášků nebo vláken

Materiály s relativně nízkou pórovitostí (mezi 30-50%) mohou být vyrobeny ze spékáním zhuštěných kovových prášků (obr. 3.13). Pórovitost může být zvyšována přidáním materiálem, který se vypaří nebo rozpadne během spékacího procesu. Částečná nebo úplná náhrada kovových vláken za kovové prášky, zvýší pórovitost 96-98% což znamená, že mohou být použity jako vysoce propustnostní filtry. Pěny vyrobené z vláken mají výrazně vyšší pevnost, tažnost a dobře absorbují nárazovou energii, než ty vyrobené z prášků.



Obr. 3.13 Nahoře: výroba kovových pěn spékání kovových prášků nebo vláken, Dole: výroby pěny s vyšší pórovitostí přidáním výplňového materiálu [14].

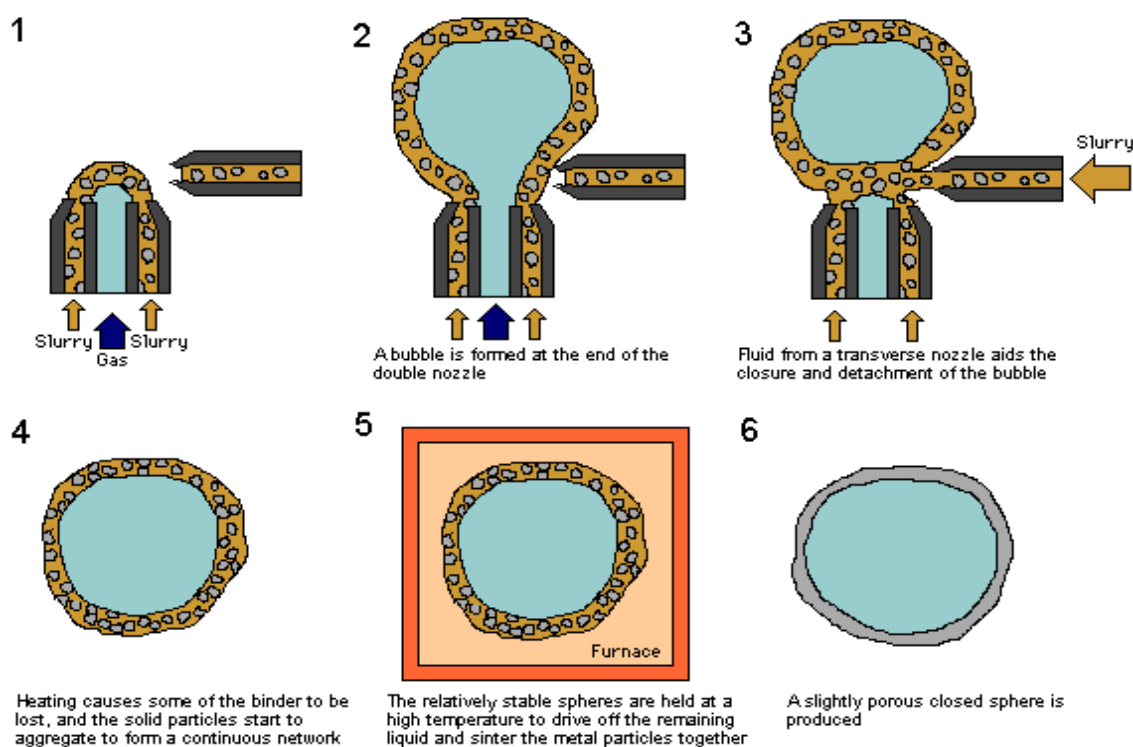
Překlad: (Metal powders or fibres » *Kovové prášky nebo vlákna*, Sintered to form a foam » *Spékání*, Similar but with added filler which decomposes at high temperature » *To samé, ale s přidáním výplňového materiálu, který se při vysoké teplotě rozloží*, The resulting foam has a lower density » *Výsledná pěna má vyšší hustotu*)

Výroba pěn z vláken má vyšší pórovitost, ale jsou dražší na výrobu a zpracování, protože kovové vlákna jsou drahé. Nejčastěji použitými materiály jsou bronz a nerezová ocel, ale dají se také použít vysoce legované slitiny nebo titan. Způsob této výroby je velice těžký vzhledem k vytvoření filmu oxidu hlinitého na povrchu, ten zabraňuje spékání částic, při výrobě hliníkové pěny.

3.2.5. Spékání kovových dutých koulí

Kovové pěny mohou být také vyrobeny spékáním dutých kovových koulí. Při této výrobě se dá snížit hustota vyráběné pěny. K vytvoření pěn používáme kuličky, které jsou například z niklu, titanu, oceli nebo z mědi.

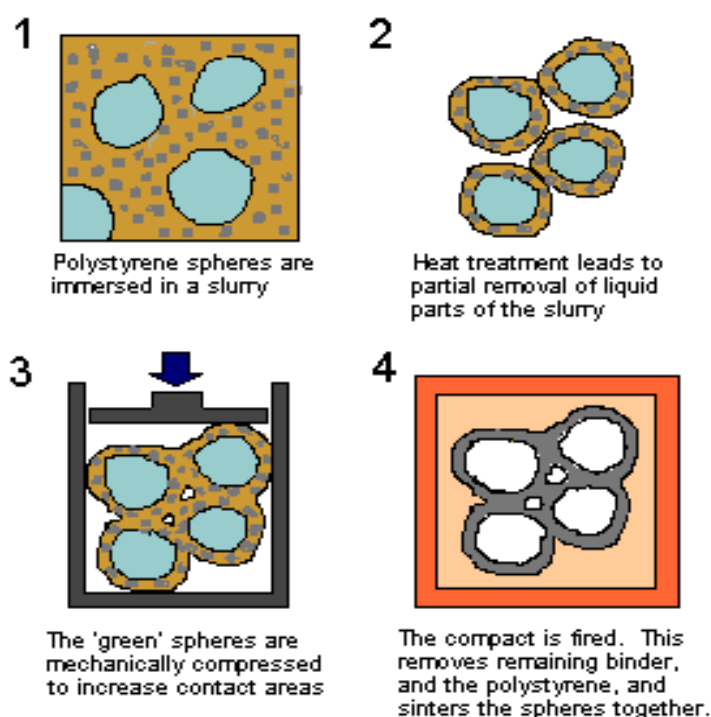
První způsob výroby využívá dvojtryskové zařízení, to je ukázáno na (obr. 3.14 - 1). Plyn je foukán přes vnitřní trysky, plyn se skládá z rozptýlených pevných částic ty mohou být kovové, keramické nebo smíšené. Pojiva stabilizátoru, dispergačního prostředku a prchavé kapaliny se vstříkují vnější tryskou. Ve vnitřní trysce pulzuje plyn a příčná tryska pravidelně vstříkuje kapaliny přes výstupní koaxiální trysku (obr. 3.14 - 2) a oddělení (obr. 3.14 - 3) uzavřených kuliček. Těkává kapalina se do jisté míry vypařuje a pevné části splynou a vytvoří poměrně stabilní koule (obr. 3.14 - 4). Koule jsou pak ohřívány při vysoké teplotě (obr. 3.14 - 5), dojde k odstranění zbývající tekutiny, abychom odstranili vlhkost a vzniknou kovové koule s poměrně jednotným průměrem a tloušťkou stěny (obr. 3.14 - 6) [14].



Obr. 3.14 Výroba dutých koulí ze suspenze, která obsahuje kovový prášek. [14]

Když budeme používat oxidický kovový prášek během spékání na zevnější kouli, dojde k přímé redukci oxidu, ty se propojí v místech dotyku. Takhle se vyrábějí například ocelové pěny o hustotě 80 až 87 %. Cementování těchto pěn vede k dalšímu zlepšení mechanických vlastností. Koule vyráběné touto metodou mají průměry v rozmezí 500-600 μm , a tloušťkou stěny 5 – 400 μm .

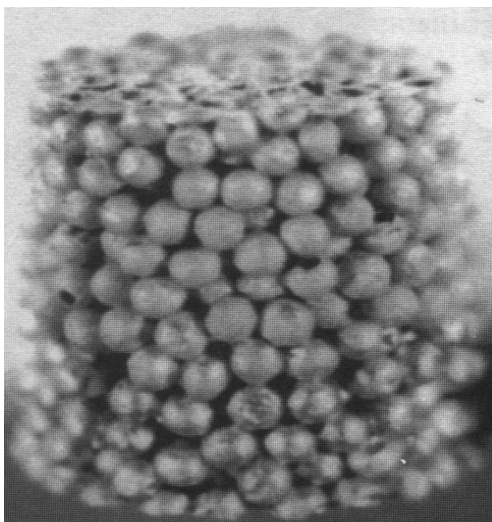
Další metoda je zobrazena na obrázku níže, zahrnující vrstvu pevných koulí vyrobených z polystyrenu. Používané polystyrenové kuličky, ty se namáčejí do směsi, která se skládá z práškového kovu, pojiva a kapaliny (obr. 3.15 - 1.). Pomocí žíhání se odstraní tekutá fáze (obr. 3.15 – 2.) Tato metoda výroby koulí je méně složitá, a proto levná. Polystyrén uvnitř dělá materiál méně náchylný k prasknutí, proto se při lisování zvětší plocha, kterou se jednotlivé kuličky mezi sebou dotýkají (obr. 3.15 – 3.). Dalším krok je vypalování, kdy se odstraní polystyren a pojivo a dojde ke spékání kovových kuliček (obr. 3.15 – 4).



Obr. 3.15. Postup na výrobu kovových pěn za použití kuliček vyrobených z polystyrenu[14].

Vysvětlivky: 1) Polystyrénové koule jsou ponořeny do směsi, která je složena z práškového kovu, pojiva a kapaliny. 2) Tepelné zpracování vede k částečnému odstranění vlhkosti. 3) Kuličky jsou stlačovány a dochází ke zvýšení kontaktu mezi kuličkami. 4) Posledním krokem je odstranění pojiva, polystyrenových koulí a dochází ke spékání kovových kuliček pomocí žíhání.

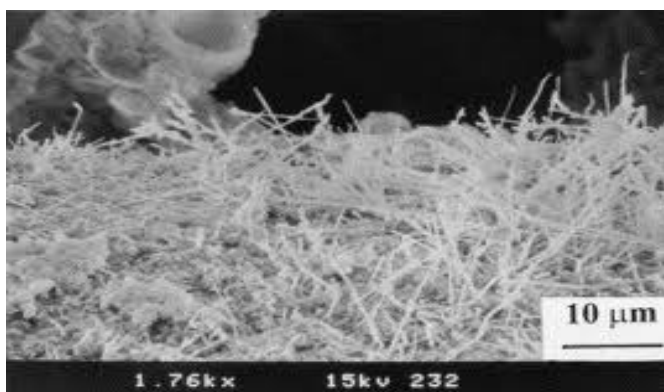
Průměr takto vyrobených kuliček se pohybuje v rozmezí 0,8 až 8 mm, a tloušťka stěn od 10 do 100 μm .



Obr. 3.16 *Pěna tvořená spékáním kovových koulí z Fe- Cr [14].*

3.3. Elektrolytické pokovování

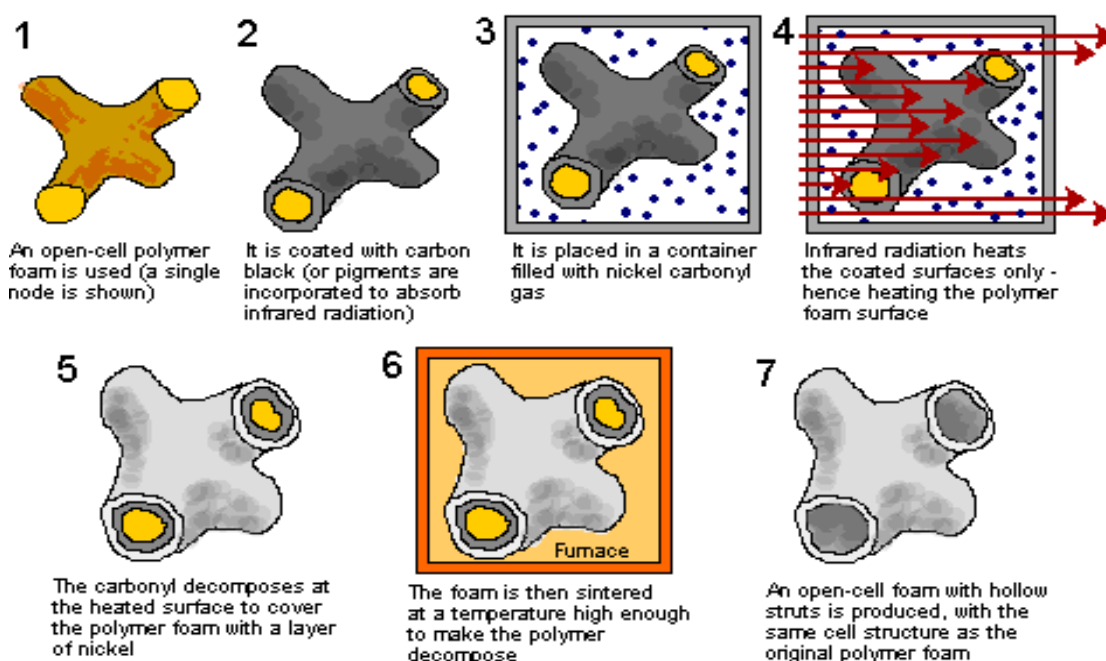
Tato metoda, používá k elektrickému pokovování polymerní pěnu, která má otevřené póry, ta je následně odstraněna. Tato pěna musí být elektricky vodivá, aby bylo možné tento způsob výroby provést. Dále provádíme, už samotné elektrolytické pokovování, a následuje žíhání, tímto krokem se odstraní polymerní pěna. K výrobě se používá zejména niklu, ale vyrábí se i hliníkové a měděné pěny.



Obr. 3.17 *Nános vyrobený po pokovení [17].*

3.4. Vakuové napaření

Vakuové napaření je způsob výroby u, kterého se používá kovové páry. Ty vznikají ve vakuové nádobě a zhušťují se na studeném prekursoru. Poté se pěna přikryje například vrstvou sazí, a ty absorbují infračervené záření. V dalším kroku zahřejeme prekursor. Kondenzující kov pokrývá povrch polymerního prekursoru a vytváří vrstvu o určité tloušťce, závislou na měrné hmotnosti páry [1]. Dále vyžítáme vytvořený materiál, a tím odstraníme polymerní pěnu a vznikne nám materiál, který má podobnou strukturu, jako pěny vyrobená elektrolytickým pokovováním.



Obr. 3.18 Postup výroby niklové pěny s otevřenými póry [14].

Vysvětlivky: **1.** Použití polymerní pěny s otevřenými póry, **2.** Pěna je pokryta sezemi, nebo jinou látkou která absorbuje infračervené záření, **3.** V nádobě na pěnu působí plyn $\text{Ni}(\text{Co})_4$, **4.** Infračervené záření zahřívá povrch pěny a $\text{Ni}(\text{Co})_4$ se rozkládá a vzniklý Ni kondenzuje na povrchu pěny, **5.** Odstranění polymerní pěny je prováděno žíháním, **6.** Pěna je zahřátá na teplotu aby se polymerní pěna rozkládala, **7.** Otevřené póry mají stejnou buněčnou strukturu jako původní polymerní pěna (Niklová pěna s otevřenými póry).

4. Závěr

V bakalářské práci se zabývám popisem kovových pěn, jsou ultralehkým materiálem, který má vysokou tuhost ve velmi nízké hustotě, absorbuje velké množství nárazové energie, je vysoce účinný při pohlcování zvuku, elektromagnetické stínění a tlumení vibrací, plně recyklovatelný, žáruvzdorný, nehořlavý. Tyto pěny se staly velice atraktivní pro automobilový průmysl. Vynikající vlastnosti umožňující použití v lehkých konstrukčních prvcích, moderních vozidlech navrhnutých zvláště pro strukturu rámu, závěsné části a crash absorpční prvky. Využití pěn také spočívá v distribuci nosného materiálu, aniž by bylo nutné zvýšit celkovou hmotnost. Aplikace pěn také zvýší schopnost pohlcovat nárazovou energii, snížit hluku a vibrace.

V první části bakalářské práce se zabývám vlastnostmi kovových pěn, dále potom uplatněním, použitím těchto materiálu v automobilovém průmyslu a také vlastnostmi kvůli, kterých jsou tak zajímavé. Další části se věnuji výrobou kovových pěn, kdy je možno je vyrobit několika možnými postupy. Poté následují lité kovové pěny, u těchto pěn jsem měl možnost si danou technologii výroby vyzkoušet v praxi.

Porovnání kovových pěn s plným materiálem, který nemá póry. Kovové materiály s pórovitou strukturou mají dobrou schopnost pohlcovat mnohem větší množství energie při deformaci. Tato vlastnost se využívá nejvíce v automobilovém průmyslu, kde je využívána k výrobě konstrukcí určených k tlumení nárazové síly. Jiné možné použití je ve výrobě lehkých konstrukcí, které mají jádra vyplněné kovovou pěnou, ty si ponechávají své mechanické vlastnosti, ale sníží se jejich hmotnost a také se ke zhotovení použije méně materiálu.

5. Seznam použité literatury

- [1] Banhart, John. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and *metal foams* [online]. Progress in Materials Science, 2001, 46, s. 559–632. [cit. 2012-02-03] <http://www.aluminiumschaum.de/papers/banhart01d.pdf>
- [2] Lichý, P. - Bednářová, V.: Lité porézní kovy – výroba a vlastnosti, Slévárenství, LX, 2012, No.1/2, s. 6-10, ISSN 0037-6825 [cit. 2012-01-15]
- [3] Zyryanová, I.: Lité kovové pěny z Al slitiny, diplomová práce, 2011 [cit. 2012-02-05] <http://dspace.vsb.cz/handle/10084/87705>
- [4] Časopis MM Průmyslové spektrum – Výrobky z hliníkové pěny, 2007 [cit. 2012-01-21] <http://www.mmspektrum.com/clanek/vyrobky-z-hlinikove-peny.html>
- [5] Obrázek crash test Audi Q7. [cit. 2012-01-12] <http://www.autoevolution.com/crash-tests/audi-q7-2006.html>
- [6] Obrázek baterie mobilu. [cit. 2012-01-17] http://www.mobilni-telefony-biz.cz/nokia/baterie/baterie-nokia-bl-5c_602.html
- [7] Obrázek struktury lidské kosti. [cit. 2012-03-02] <http://www.ulekare.cz/clanek/kostni-tkan-11110>
- [8] Video využití kovové pěny při stavbě lodí. [cit. 2012-02-06] <http://www.ceskatelevize.cz/porady/10121359557-port/685-kovove-peny/video/>
- [9] Kovová pěna centrum Chemnitz http://www.iwu.fraunhofer.de/content/dam/iwu/en/documents/metal_foam_en.pdf
- [10] Obrázek porovnání struktury chleba a kovové pěny. [cit. 2012-02-08] http://foodfordesign.blogspot.com/2007_03_01_archive.html
- [11] Obrázek deska vyrobena nízkotlakým litím. [cit. 2012-02-21] <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0012/Banhart-0012.html>
- [12] Michna, Štefan, et al. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, s.r.o., 2005. ISBN 80-89041-88-4. [cit. 2012-02-07]
- [13] Struktura pěny ALPORAS. [cit. 2012-03-15] <http://www.rug.nl/natuurkunde/onderzoek/groepen/mimec/research/metallicfoams?lang=en>
- [14] Curran, Dave. *Metal Foams*. [cit. 2012-03-25] <http://www.msm.cam.ac.uk/mmc/people/old/dave/dave.html>

[15] Obrázek sendvičová kovová deska a obrázek výrobky se souvislou kovovou vrstvou. [cit. 2012-03-08] <http://www.isotechinc.com/foamed-aluminum.html>

[16] Curran, Dave, C. Aluminium Foam Production using Calcium Carbonate as a *Foaming Agent* [online]. Cambridge, December 2003. 188 s. Dizertační práce. University of Cambridge. [cit. 2012-03-10]. http://www.msm.cam.ac.uk/mmc/publications/thesis/2003-12_DCC_PhD_thesis.pdf

[17] Obrázek nános vyrobený pokovení. [cit. 2012-04-16] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025540899001038>

[18] Bratislava automative congress. [cit. 2012-04-22] http://www.metalfoam.net/Papers-conference/2001%20Bratislava_New%20concept_.pdf